

# 旱地农业发展中若干生物学问题的探讨

山 仑

(中国科学院水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**植物抗旱节水生物学是发展旱地农业和缺水地区农业的重要学科基础,当前面临的主要问题包括:在研究路线上,如何正确处理分子水平研究与整体性研究之间的关系,以促进两者的互补;在研究目标上,如何做到抗旱性、水分利用效率、产量性状的有效结合,以实现高产高效;在研究成果应用中,如何切实加强学科交叉,以尽快取得实际效果。在论述上述问题的同时,对当前半干旱和半湿润地区与抗旱节水生物学有关的几个实践中的科技难点作了介绍,并提出建议。

**关键词:**旱地农业;抗旱节水生物学;水分利用效率;补偿效应;学科交叉

**中图分类号:** S-3, S184 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-0864(2009)02-0005-05

## Discussion about Several Biological Issues for Development of Dryland Farming

SHAN Lun

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Northwest A&F University, Shaanxi Yangling 712100, China)

**Abstract:** Plant drought-resistant and water-saving biology is an important subject basis for developing dryland farming and agriculture at water-scarce regions. The major issues facing us include: in terms of research route, how to correctly deal with the relation between studies on molecular level and on plant as a whole, so as to promote the mutual supplement of the two; in terms of research orientation, how to combine effectively drought resistance with water use efficiency and yield properties, so as to realize high yield and high efficiency; in terms of application of research findings, how to strengthen interdisciplinary of subjects, so as to achieve actual effect as soon as possible. The paper introduces several scientific and technological difficult points in the practice related to drought-resistant and water-saving biology in semiarid and sub-humid regions. And suggestions are proposed.

**Key words:** dryland farming; drought-resistant and water-saving biology; water use efficiency; compensatory effect; interdisciplinary subjects

从本来意义上讲,旱地农业主要指半干旱地区在没有灌溉条件下的农田生产。由于世界范围的缺水日趋严重,干旱逆境的出现已不限于特定地区,也不仅限于旱作条件下。本文着重讨论半干旱和半湿润易旱地区的旱作农业问题,也涉及到其他缺水地区,包括缺水灌区。旱地农业是一个广阔的研究领域,具有很强的综合性,可以从不同学科出发开展研究,植物生物学是其重要学科基础之一,特别是从未来的需求考虑。下面将主要探讨在旱地农业发展过程中出现的与植物生物学研究有关的几个问题。

### 1 改造环境与改造植物的关系

改善和提高干旱胁迫下的农田生产力不外乎通过两个途径:一是改造环境(包含区域环境和生长条件)使之适应于植物的需要,二是改造植物本身以适应外部环境。前者包括:气候调节,土地改造,土壤改良,补充灌溉,以及采取防止蒸发、渗漏、水土流失等措施;后者则主要包括遗传改良,生理调控,群体适应(作物互补)等。两者之间紧密联系,互为基础,实践中不可截然分开,但

收稿日期: 2008-12-05; 修回日期: 2009-03-09

作者简介: 山 仑, 中国工程院院士, 主要从事生物节水及半干旱地区农业发展研究。 Tel: 029-87018325; E-mail: shanlun@ms.iswv.ac.cn

毕竟这是两条不同的技术路线。

到目前为止,在实际生产中应对干旱的主要措施多属于前者。就世界范围而言,除灌溉以外,保护性耕作的推行和农作制的改进起了重要作用,而针对旱区的品种改良则相对进展较慢。在我国典型的半干旱地区黄土高原,旱作农田生产已经历了三个主要发展阶段:传统耕作,兴建基本农田,增施化学肥料。20世纪80年代以后黄土丘陵区的地方农家品种才被逐步替代,至今仍缺乏针对性强的抗旱育种工作。当前黄土高原地区处于以推行覆盖和集雨技术为主的新阶段,部分地方设施农业有了一定发展。从水分高效利用角度上看,上述发展阶段主要体现了:从保水保土充分利用土壤储水和最大限度降低土壤蒸发就地汇集雨水加以利用。概括而言,主要通过提高水分利用率的途径实现增产,而如何提高作物自身的水分利用效率和抗旱性则涉及较少。

由于水资源的紧缺,今后大范围扩大常规灌溉面积已不可能,其他改变环境以适应植物需要的措施已得到较广泛应用,虽仍有潜力可挖,但进一步发展难度加大,故改造植物本身以适应环境的技术途径愈来愈受到人们重视,被认为是未来旱区与缺水地区农业取得新突破的希望所在。

## 2 植物抗旱节水生物学研究面临的问题

在植物生理学发展史上,由于植物水分与抗旱性研究与农业生产实践联系紧密,当属最早开展的研究领域之一,一直备受关注,但其实际进展及对农业所作出的贡献并不令人感到特别振奋,已发挥的作用低于应发挥的作用。自20世纪80年代以来,由于干旱缺水日趋严重,加之分子生物学和生态学的思想与方法不断渗入,该领域的研究进入了一个新的充满活力的时期,其研究深度与广度超出了传统植物生理学的范围,涵盖了植物生理学、结构植物学、分子生物学和生态学,可统称为植物抗旱节水生物学。不同学科之间关系密切,不可替代,但其核心目标是依据于变动中的外部环境,从分子水平上,深入阐明植物对干旱胁迫整体适应的生理机制,为旱区和缺水地区的作物改良和田间管理提供科学依据。

植物抗旱节水生物学要更好地服务于旱地农业发展,当前面临以下三个问题。

### 2.1 正确处理分子水平研究与整体性研究的关系

植物抗旱性是一个十分复杂的性状,不但是多基因控制的,而且是通过不同途径实现的,另外,从植物感受干旱直至影响到产量性状要经过一系列的转化过程,抗旱性与产量之间往往存在不确定关系。在现有重要粮食和经济作物中,耐旱(耐脱水)性状很少成为适应干旱的决定性因子,而目前植物抗旱转基因的研究则多限于耐旱性的范围。就耐旱性本身而言,也存在着多种生理适应机制(如抗渗透胁迫、抗氧化、抗脱水等),每一种耐旱机制又受多种酶类和非酶类物质所控制,如考虑到调控分子的作用,干旱胁迫影响的问题就更加复杂。2008年 Science 一篇报道中原引 California 大学 Jian-Kang Zhu (朱健康)的观点强调:“解决干旱胁迫危害,对于植物生物学而言,如同动物生物学解决恶性肿瘤那样,是复杂而艰难的”<sup>[1]</sup>。

基于这一情况,同时加强植物抗旱分子水平研究和整体性研究是必要的,但当前的倾向是重视前者而忽视后者。这里所说整体性首先指的是抗旱机理本身。近年来,基于已知耐旱机制克隆相关基因,或利用基因表达图谱筛选耐旱基因技术层面的工作发展较快,微观耐旱分子机理的工作也不断有一些新的报道,但抗旱生理机制及相关个体水平上的研究却进展缓慢,亟待加强。仅就耐旱性本身而言,今后需要深入阐明已知不同耐旱机制的相对重要性,并探索新机制,以明确特定条件下起关键作用的耐旱机制,为定向分离克隆耐旱主效基因或进行与耐旱有关基因的有效聚合提供基础。为此,不应停留在耐旱分子机制的研究阶段,只有做到从分子水平上充分阐明了植物耐旱的生理机制才有可能实现上述目标。

强调加强整体性研究不限于解决植物耐旱机理本身,也是为了促进机理与应用的衔接与结合,为旱区农业发展作出直接贡献。在这一方面,整体抗旱性主要指植物与环境之间的量化关系,将提高水分吸收能力,控制失水能力,增强抗脱水能力综合起来,并与区域环境相联系,这显然是一项十分复杂的系统工程,但可以先从若干专门问题入手开展研究,如植物对干旱的阶段性反应,不同植物种在抗旱生理和适应途径上的差异,以及干旱胁迫下的根冠关系、库源关系,营养生长与生殖

生长的关系等。鉴于植物抗旱性的复杂性和提高旱区与缺水地区农业生产的紧迫性,在这方面倡导组织进行长期系统的综合研究是必要的。

## 2.2 重视抗旱性与水分利用效率研究的结合

植物抗旱性与水分利用效率(WUE)的关系在历史上曾有争议,现在则认为,两者相互联系,但并非同一性状。2004年第四届国际作物科学大会上 Passioura 提出<sup>[2]</sup>,在农业生产中,抗旱性和耐旱性类同于水分生产力(water productivity)概念,“耐旱性”向“水分生产力”的转变是一个进步,因为后者可以量化。其实不仅是一个量化问题,强调WUE的重要性是向田间应用迈进了一步,使研究目标更加清晰,对于旱地与灌溉地都有实际意义。2004年出版了由 Bacon 主编的“Water Use Efficiency in Plant Biology”<sup>[3]</sup>,这是一部从分子、细胞、个体和群体水平上综合阐述WUE的生物学专著,其中有些章节还涉及到流域和生态系统。由此可见,WUE的研究较植物抗旱性研究开阔,且与当前应用联系紧密。WUE与抗旱性有时呈正相关,有时呈负相关;WUE与产量经常是正相关,也出现负相关,未来的任务则是尽可能实现三者的有效结合。

当前,从应用角度已将提高WUE的概念扩展为“生物节水”。生物节水是一个有明确应用目标的科学命题,超出了WUE原义,系指利用和开发植物自身的生理和基因潜力,在同等水量条件下获得更多的农业产出,或在减少水量供应条件下获得等量的农业产出。为提高WUE,既包括了本来意义上的直接技术(通过调节气孔和水导控制蒸腾),也包含延伸意义上的间接技术(如培育矮秆或耐旱品种,促进光合产物向籽粒或经济部分运转等)。在我国中长期科技规划中已将“生物节水”列为农业综合节水中的一项重要内容,2005年举办了以生物节水为主题的267次香山科学会议,2006年我国学者主持召开了第一届国际生物节水学术讨论会。由于生物节水概念已被广泛接受,客观需求也较明确,因而近期内提高WUE的技术较提高抗旱性的技术更具现实性,问题在于,当前还缺乏这方面系统深入的理论研究。

## 2.3 切实加强学科交叉

为使植物抗旱节水生物学研究成果在实践中得到应用,实行学科交叉是必由之路。例如,为建立节水型农业结构,需要农学家、生态学家、水利

学家以及农业经济学家的共同努力;为实行精量有限灌溉,必须掌握作物需水规律的详细资料,同时运用信息技术,并通过有效的工程技术加以实现;要培育出得到广泛应用的抗旱新品种,则需要常规育种技术与分子育种技术的有效结合等,从历史和现状看,这方面还存不少问题。例如,在20世纪30年代,前苏联学者根据水分条件与光合作用关系的研究资料在伏尔加河灌区推行减少春小麦灌溉定额的措施,结果招致失败,究其原因,并非原理上的谬误,而是还不具备实行精量灌溉的条件。美国学者 Kramer 1980年就曾指出<sup>[4]</sup>,植物生理学对农业的作用之所以小于它应有的贡献,主要原因之一是“由于实验室与田间科学家之间的隔阂”,即交流合作不够,事隔20多年以后问题依然存在。2005年在罗马召开的第二届国际干旱大会的结论与建议中又指出:“当前植物与农业科技工作者的着重点已从常规学科向分子生物学方面迅速转移,这就使传统学科和常规技术整体研究能力下降,从而造成不利后果,也减缓了生物技术向田间的转移。”为此强调“未来耐旱转基因作物的成功,取决于多学科的协作。建议切实加强学科之间的协作与集成。”<sup>[5]</sup>这一认识无异是十分正确的,但解决这一问题还需要组织部门的远见与有力协调,及研究者的自觉行动;另一方面也要承认,学科的发展阶段也是一个限制因素,目前作物抗旱转基因研究是否已具备进入田间应用的客观条件,也值得讨论。

## 3 与抗旱节水生物学有关的几个实践中的问题

### 3.1 关于加强对干旱适应性的育种工作

20世纪,在世界适宜降水地区,小麦品种改良效果显著,平均年增产30~38 kg/hm<sup>2</sup>,而在半干旱地区仅增产6 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。世界第一次绿色革命是以培育高产品种和满足高水肥需求和有效防治病虫害为特征的。目前由于水资源紧缺,环境污染加重,这一生产模式的主导地位受到质疑。第二次绿色革命将会是怎样的?需要探讨。我国当前的作物育种方向实际上是以高产优质为主,总体上是适当的,但亦应增加适应性强(资源高效利用)的要求。特别对于干旱缺水或存在其他逆境的地区,将抗逆性和广适应作为独立的育种方

向已刻不容缓,但这一方面至今还缺乏系统的有针对性的研究和明确的技术路线。

在现阶段,就生产环节上看,常规育种仍属作物育种的主流技术,对干旱缺水地区而言更是如此,在有限水分条件下生长良好的品种已遍及世界许多地方。我国近年来在河北、山西、山东等地也培育出一批对干旱缺水适应性较强的水、旱地品种,并已推广应用。相比之下,虽然通过转基因技术已获得相当数量的耐旱转基因植株,但总体上仍处于实验室阶段,至今尚未获得商业用品种。如第二届干旱大会所指出的“基因组研究信息如此之多,但这些信息在缺水条件下的田间应用又如此之少。指出这一点,决非否认抗旱转基因技术在未来可能产生和巨大作用,只是想强调,当前不可忽视常规育种和常规技术的重要作用,国家和地方在科技立项、人才培养和资金支持上应注意保持平衡。

结合我国国情,针对半干旱地区特点,就加快转基因抗旱育种进程提出几点看法:

在研究目标上,将对干旱的适应性放在第一位,力求抗旱性与高 WUE 同时实现,达到中等以上产量水平,目前不必追求高产目标。

在技术路线上,根据半干旱地区多变的低水环境,从多吸水、少失水、耐脱水的综合性状中寻求突破口,切实加强分子育种与常规育种的结合,从技术入手和从机理入手并进。

在研究对象上,除农作物外,当前将获得抗旱转基因植物研究的另一个重点放在林草植物上更为可行,因为这方面的抗逆基因资源更为丰富,而且与一年生农作物相比,对这类植物而言,存活需求是第一位的,产量高低是第二位的,生态效益在先,只要生存下来,就有机会实现其生态经济目标。

最后,应系统组织植物抗旱性的基础研究,只有在分子机理和整体性机理的结合上有所突破,方能将抗旱育种工作推向一个新的发展阶段。

### 3.2 关于利用种间抗旱性差异建立节水型农业结构

比较研究不同种之间抗旱性差异既利于探求植物抗旱性机制,同时还可为干旱缺水地区调整种植制度,特别是建立节水型农业结构提供生物学依据。

通过改变农业结构来降低作物蒸腾量或增大蒸腾对蒸发的比例以达到节约田间和区域耗水、

增强对干旱适应能力的技术途径可统称之为“群体适应”(community adaptation)或“作物互补”(crop complementarities),看似一种宏观对策,但必须依据于生物节水原理,在当前是一种可在大范围内产生效果,且较为现实的生物-农艺抗旱节水策略。一些国家将部分稻田改为旱作,减少玉米面积改种高粱等可以视为体现这一策略所采取的措施。目前,通过这一途径提高降水利用效率的重要性受到重视<sup>[7,8]</sup>。

地处黄土高原半干旱地区的甘肃省,70%以上的耕地是山旱地,经多年反复实践后认为<sup>[9]</sup>,利用作物自身的抗旱潜力,通过积极调整种植结构是抗旱防灾的一条重要措施。他们的经验表明,通过“压夏扩秋”,尽可能扩大耐旱秋作物的种植面积,特别是马铃薯的面积,建立马铃薯生产加工基地,促进产业化,是十分成功的。刘忠民等<sup>[10]</sup>在宁夏南部山区多年的实验表明,不同作物 WUE 变化顺序为:豌豆 > 糜子 > 谷子 > 春小麦,首茬年均耗水量为 379 mm,高出其他作物 42%,故认为粮豆轮作的用水经济,利于培肥地力,是该地区较适宜的轮作方式,而粮草轮作的推行则是有条件的。

紫花苜蓿被认为是我国北方地区最重要的多年生豆科牧草,既高产、优质,又抗旱,但虽经积极倡导,至今依然发展缓慢,重要原因之一是对其适应能力缺乏全面认识。研究发现,苜蓿抗旱能力较强,主要是由于具有强大的根系,实际上属于一种高耗水低水效的牧草作物,其耐旱能力明显低于抗旱作物<sup>[11]</sup>,且易造成土壤深层干燥化,在充足供水条件下可获得高产,在严重干旱下则生产力低下。苜蓿虽可在 300 ~ 800 mm 降水地区广泛种植,但为了获得较高的比较效益更应在半湿润地区发展,而在半干旱地区则应选择适宜土地(特别要求土层深厚),有条件的地方应施以补充灌溉,不宜盲目提倡“引草入田”。

高粱具有全面抗旱能力,在栽培作物中无可比拟,堪称半干旱地区的模式抗旱作物,但从 20 世纪 60 年代至今,我国高粱面积下降了 7 倍,同期美国只下降了 29%。这一情况应引起关注。高粱与玉米比较,虽品质较差,价值较低,但用途同样广泛,抗逆性则更强。综合有关试验资料,充足灌溉条件下高粱产量低于玉米 25% 左右,但在中等以上干旱条件下则比玉米高出 50% 甚而 1 倍以上。因此,今后仍应在降水量低于 400 mm 地区

适当发展,特别是利用“边际”土地加大发展。

利用种间在抗旱性和水分利用方面的差异进行作物布局调整还存在很大潜力,建议今后从多目标角度扩大试验范围,除大田粮食作物外,还可以进行谷类、豆类、牧草和经济作物之间的比较,以及栽培种与野生草的比较,以期为植物抗旱节水机理研究探索新路,并促进干旱缺水地区农业结构的进一步优化。

### 3.3 关于应用补偿效应原理在半湿润地区发展半旱地农业

典型半湿润地区——黄淮海平原,属于农业主产区,是我国最重要的综合性农业生产基地,同时又是水资源供需矛盾最为尖锐、农业用水最为紧张的地区。但该地区年平均降水量为 600 ~ 800 mm,适宜于发展粮食生产,目前灌溉面积已占到耕地的 65% 左右(有的省份已达 70% 以上),再扩大的余地较小,进一步挖掘降水生产潜力是解决水资源短缺和保持农业可持续发展的必然选择。

长期以来,农业用水不外乎采取两种做法,旱地农业,或灌溉农业,而实际上它们之间是互通的,应当看作是一个连续系统,在两者之间可以有更多的选择。选择之一就是实行半旱地农业。可以将半旱地农业理解为运用旱作技术,在充分利用自然降水的基础上进行少量水补充灌溉的农业。所谓少量水大体概念是将灌溉量降至当前灌溉定额的 1/2 以下,根据不同情况每  $\text{hm}^2$  补充供水约 600 ~ 1500  $\text{m}^3$ 。此法的可行性还需要认真研究,不过实践中已出现了一些成功实例,从植物生物学角度也有了一定的研究基础。结合文献报道,可将其生物学依据归结如下<sup>[12]</sup>:

水分亏缺对与产量形成相关生理过程的影响程度不同,其中生长(细胞扩张)对干旱反应最为敏感,而物质运输(光合产物分配)最为迟钝,这使根据生长发育进程主动调节供水成为可能。

作物不同生育阶段对水分亏缺敏感性不同,可以利用非敏感期减少供水。

不同作物和品种间的抗旱性和 WUE 存在显著差异,小麦等作物在进化过程中 WUE 有递增趋势,培育高产节水品种是可以实现的。

同一作物在不同栽培条件下 WUE 差异十分明显,WUE 高值往往是在中等供水条件下,而不是在充足供水条件下获得的。

在变水-干湿交替环境中生长的作物较在

一直充足供水下生长的作物对干旱的来临具有更强的适应能力,但种间差异很大。

从已有研究进展中看出,通常意义的缺水并不必定导致产量降低。许多作物在一定生育阶段经受适度水分亏缺可能对节水和增产都有利。其机理可初步解释为:干旱缺水对作物有一个从“适应”到“伤害”的过程,不超过适应范围的缺水,往往复水后可在生理、生长和产量形成上产生补偿效应,在节约大量用水的同时,最终产量基本不受影响。

作为农田用水制度的一大变革,半旱地农业建设具有很强的综合性、严格的区域性和一定的风险性。在这一系统综合研究中,植物抗旱节水生物学无疑会找到自己的位置,在提供实施原理和依据方面作出应有的贡献。

### 参 考 文 献

- [1] Pennisi E. Plant genetics: The blue revolution, drop by drop, gene by gene[J]. *Science*, 2008, 320(5873): 171 - 173.
- [2] Passioura J. Increasing crop productivity when water is scarce: from genetics to field management[A]. In: *Proceedings of the International Crop Science Congress*[C]. Brisbane, Australia, 2004.
- [3] Bacon M. *Water Use Efficiency in Plant Biology*[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.
- [4] Kramer P J. 植物生理学在作物改良中的作用[A]. 见:黄宗甄编,植物生理学在农业中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1983, 51 - 56.
- [5] Blum A. Conference conclusions and recommendations[A]. In: *The 2nd International Conference on integrated Approaches to Sustain and Improve Plant Production under Drought Stress* [C]. Rome, Italy, 2005.
- [6] Tumer N C. Further progress in crop water relation[J]. *Adv. Agron*, 1997, 58: 293 - 337.
- [7] Tumer N C. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems[J]. *J. Exp. Bot*, 2004, 55(407): 2413 - 2425.
- [8] Van Duivenbooden N, Pala M, Studer C, *et al.* Cropping system and crop complementarity in dryland agriculture to increase soil water efficiency: a review [J]. *Netherlands J. Agric. Sci*, 2000, 48(3): 213 - 236.
- [9] 陸 浩. 旱作农业的一场革命——关于总结推广全膜双垄沟播技术的思考[N]. *光明日报*, 2008-08-05.
- [10] 刘忠民,山 仑,邓西平,等. 宁南山区草田轮作研究:不同轮作制度下的农田水分平衡[J]. *水土保持学报*, 1993, 7(4): 68 - 71.
- [11] 山 仑,张岁岐,李文晓. 论苜蓿的生产力与抗旱性[J]. *中国农业科技导报*, 2008, 10(1): 12 - 17.
- [12] 山 仑. 生物节水——未来节水潜力最大的领域[A]. 见:香山科学会议主编,科学前沿与未来,第九集[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2008, 158 - 168.